干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

艾比湖流域植被时空变化及驱动力分析

任立清
（乌鲁木齐气象卫星地面站，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：植被是反映陆地生态系统变化的敏感因子之一，对维持和调节生态系统稳定具有重要作用。以生态脆弱区艾比湖流域为研究区，采用地理探测器模型，研究艾比湖流域自然、人文因子及其交互作用对植被时空覆盖变化的影响，分析各影响因子促进植被生长的适宜范围(类别)。结果表明：(1) 2000—2020年艾比湖流域归一化植被指数(NDVI)呈现增加趋势，增速为0.035·(10a)$^{-1}$，生态环境得到有效改善，改善区域主要分布在中西部，显著提高地区主要位于艾比湖中部，严重退化地区零散分布在艾比湖中部中心位置。(2) 土地利用类型、植被类型和土壤类型因素对植被NDVI空间分布的影响力大于其他因子，是主要影响因子。自然、人文因子之间对植被NDVI的交互作用以非线性增强和双因子增强效应为主，不存在独立关系。(3) 耕地、栽培植被、人为土、中起伏山地、高程2177~2558 m、年降水量228~245 mm、年均气温4.74~5.25 ℃、坡向157.5°~202.5°以及坡度25°~35°，适合植被生长。研究结果将为艾比湖流域的生态保护提供科学依据。

关 键 词：归一化植被指数（NDVI）；植被变化；地理探测器；艾比湖流域
文章编号：

植被覆盖变化能够反映区域生态环境的变化[1]，研究植被覆盖变化及其驱动力对于区域的生态保护具有重要意义。归一化植被指数(NDVI)能够真实地反映区域地表植被覆盖状况[2]，已经被广泛应用于区域植被变化研究。刘春静等[3]以中国新疆及中亚五国为例，研究了大陆干旱性气候区植被覆盖度变化特征；刘宪锋等[4]认为西北地区植被变化与气温和降水量均呈弱的正相关性；董璐等[5]研究发现新疆地区植被NDVI对气温变化的响应逐渐降低；杜加强等[6]发现新疆地区植被变化在春、秋季受气温影响，夏季主要受降水量的影响；孙天瑶等[7]发现塔里木河流域植被NDVI与降水量的相关性更明显；庞冉等[8]认为水分条件是吐鲁番盆地大部分地区植被生长的主要限制因素。以上研究大多仅研究了气候因素对植被覆盖变化的影响，但实际上植被NDVI还受土壤类型、植被类型、地形等自然因素[9]和土地利用类型等人为因素[10]影响，并且运用的相关分析方法无法定量反映出因子的空间异质性，而王劲峰等[11]提出的地理探测器模型可以探测空间分异性并揭示其驱动力，目前已有学者将地理探测器应用于植被覆盖影响因子的研究中。彭文甫等[12]对四川植被的研究发现自然因子对植被NDVI的影响存在交互作用；裴志林等[13]发现黄河上游地区影响力气候类自然因子>非气候类自然因子>人为因子；祝聪等[14]研究发现岷江上游植被覆盖主要受海拔、气温、土壤类型、降水4个因子的影响；陶帅等[15]发现宜宾市自然因素与人类活动共同作用对植被NDVI影响更加明显；张翀等[16]运用地理探测器探测影响黄土高原植被覆盖变化的人为主导因子。

艾比湖流域地处新疆西北地区，地形复杂，流域生态环境退化严重，且生态环境空间分异性明显[17]。已有学者利用艾比湖流域的气候[18-20]、高程[21]对植被NDVI的影响做了研究，但缺乏对其他自然因子及人类活动因子的研究，且大多数运用的相关分析法，无法揭示艾比湖流域复杂的空间分异性并定量研究植被NDVI变化的驱动因子，因此本文运用一

收稿日期：2021-05-02； **修订日期**：2021-08-10
基金项目：国家自然科学基金项目(41965002)资助
作者简介：任立清(1967-)，女，硕士，高级工程师，主要从事气象卫星地面系统、气象雷达等设备及卫星资料在气象应用方面的研究.
E-mail: RenLiQingxj@163.com

元线性回归分析法分析2000—2020年艾比湖流域植被NDVI时空变化特征，运用地理探测器模型研究艾比湖流域植被的空间分异性，并探究植被NDVI变化的自然和人为驱动因子及交互作用，为艾比湖流域生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况

艾比湖流域位于新疆西北部，地理位置介于79°53′~83°53′E，44°02′~45°23′N之间，包括博乐市、精河县、温泉县和阿拉山口市，面积2.5×10^4 km²，博尔塔拉河、精河和奎屯河为三大主要支流（图1）。艾比湖流域属于温带大陆性气候，降水量少、蒸发量大，年均气温5.6 ℃，年降水量181 mm，年均潜在蒸发量1500~2000 mm[22]。艾比湖是区域内最大的湖泊，也是新疆第一大盐水湖，由于自然和人为因素的共同影响，艾比湖面积正逐渐萎缩，蓄水量减少，流域趋于干旱化[23]。区域内地貌类型多样，大部分为平原，主要的植被类型为荒漠、草原和草甸，土壤类型以钙层土、高山土和漠土为主，土地利用主要为草地和未利用土地。艾比湖流域是典型的干旱区内陆河流域，风沙灾害频繁，生态环境脆弱，对气候变化和人类活动的响应较为敏感[24]。

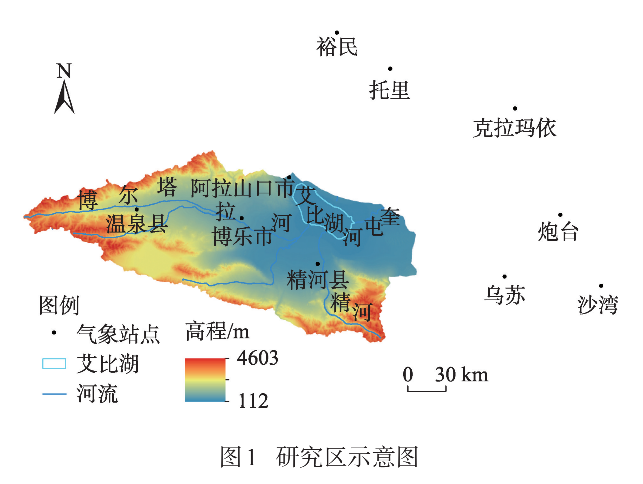


图1 研究区示意图

Fig. 1 Diagram of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

研究采用艾比湖流域植被NDVI、数字高程模型（DEM）、气候、土壤类型、地貌类型、植被类型、土地利用类型等数据。2000—2020年植被NDVI数据基于逐日植被NDVI图像最大值法合成16 d植被NDVI，其空间分辨率为1 km（https://ladsweb. nascom.nasa.gov/）；年均气温、年降水量数据采用裕民、阿拉山口、博乐、托里、克拉玛依、温泉、精河、乌苏、炮台、沙湾10个气象站点2000—2020年的实测逐月气象数据，采用反距离权重插值方法进行空间插值；土壤类型、植被类型、地貌类型、土地利用类型数据，来源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn/）；DEM数据来源于中国科学院地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/），使用GDEMV2 30 m的分辨率数字高程数据，高程、坡度、坡向由DEM数据计算获取。以上数据均按照艾比湖流域矢量边界掩膜提取，通过重采样处理，与1 km的植被NDVI数据像元大小保持一致。

2.2 研究方法

2.2.1 植被NDVI最大值合成 最大值合成法是目前应用最广泛的植被NDVI合成方法，为去除大气等影响，选择一定时间范围内的植被NDVI最大值作为该时间范围的植被NDVI值。本研究通过逐日植被NDVI图像最大值合成获得年植被NDVI图像，年植被NDVI均值为年植被NDVI图像中植被NDVI的均值。

2.2.2 植被NDVI等级划分 使用2000、2005、2010、2015、2020年MODIS植被NDVI数据，根据植被NDVI高低，按照等间距方法[25]将植被NDVI值划分为5个等级，分别为低（0.0~0.2）、中低（0.2~0.4）、中（0.4~0.6）、中高（0.6~0.8）和高（0.8~1.0）。

2.2.3 植被NDVI变化趋势分析 一元线性趋势分析法通过线性回归分析变量的变化趋势[26]。利用ArcGIS的栅格计算器对2000—2020年艾比湖流域植被NDVI进行一元线性回归，来研究艾比湖流域植被NDVI在2000—2020年的变化趋势，按自然间断点法将变化趋势分为7类：严重退化、中度退化、轻度退化、基本不变、轻度提高、中度提高、显著提高。趋势斜率公式[27]为：

$$\text{Slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times \text{NDVI}_i)-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)\left(\sum_{i=1}^{n}\text{NDVI}_i\right)}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \quad (1)$$

式中：n为研究累计年数（本研究中n=21），其中i=1, 2, …, n；NDVI_i为第i年的植被NDVI值。Slope为趋势线斜率，若Slope>0，则植被覆盖呈增加趋势；若Slope<0，则植被覆盖呈下降趋势；Slope=0，则植被覆

盖无明显变化。

2.2.4 信息提取 利用ArcGIS创建渔网工具，生成全区范围内7 km×7 km格网，共499个中心点作为采样点，提取空间上对应的X和Y属性值，最后代入地理探测器处理。

2.2.5 探测因子分级 本研究根据艾比湖流域的典型性，选取坡度、坡向、高程、土壤类型、植被类型、地貌类型、年均气温、年降水量、土地利用类型9个因子分析艾比湖流域植被NDVI变化的驱动因子。利用自然断点法[28]将土壤类型划分为12类，将坡向、高程、年均气温、年降水量划分为9类，将植被类型划分为8类，地貌类型和坡度划分7类，土地利用类型划分为6类(图2)。

2.2.6 地理探测器模型 地理探测器是探测空间分异性及其驱动因素的方法，包括4个探测器[11]。

(1) 因子探测：探测植被NDVI的空间分异性，用q值表示因子对植被NDVI的影响力，q值越大表示因子对植被NDVI的影响力越大，反之则越小。本研究中自变量X为因子Xs(s=1, 2, …, 9)，因变量Y为植被NDVI，见表1。

(2) 交互作用探测：探测不同探测因子间的交互作用，评估方法见表2。

(3) 风险区探测：用于判断植被NDVI驱动因子适宜的范围(类别)。

(4) 生态探测：判断探测因子对植被NDVI变化的影响力大小。

3 结果与分析

3.1 植被NDVI时空变化

2000—2020年艾比湖流域植被NDVI的年际变化具有增加的趋势，增长速率为0.035·$(10a)^{-1}$(图3)。植被NDVI最大值出现在2016年，达到0.42，最小值出现在2000年为0.32，研究区植被NDVI多年均值为0.37。多年植被NDVI变化在平均值周围波动，向植被覆盖增加的方向变化。将艾比湖地区植被NDVI划分为5个等级并统计面积。结果显示：植被NDVI在0.0~0.2范围内随时间变化面积由2000年的10187.80 km^2(面积占比为41.0%)降低至2020年的7067.91 km^2(28.5%)；植被NDVI处于0.2~0.4之间多年面积平均为6355.89 km^2(26%)左右；植被NDVI在0.4~0.6范围的面积由2000年的4532.56 km^2(18.3%)增长至2020年的5266.52 km^2(21.2%)；植被NDVI在0.6~0.8范围的面积均大于3700 km^2(15.0%)，植被NDVI大于0.8~1.0的面积占比由2000年的375.44 km^2(1.5%)上升至2020年的1961.88 km^2(7.9%)。

2000—2020年艾比湖植被呈现出中部高四周低的空间分布特征(图4)。植被NDVI的高值区域主要集中在艾比湖中部区域以及西北部，该地区植被类型以草甸、栽培植被为主；植被NDVI的低值区域分布在东北部地区，植被类型多为荒漠。整体来看，艾比湖植被NDVI整体呈现改善的趋势，改善区域主要分布在中部和西部地区。由图5所示，显著提高地区主要位于艾比湖中部，轻度退化区域主要位于艾比湖四周边缘。但在艾比湖中部中心位置，仍有植被严重退化区域，可能与土地利用变化有关。

3.2 植被NDVI影响因素分析

3.2.1 因子探测分析 通过因子探测部分来衡量各自然、人文因子对植被NDVI的影响强度，q值越大，说明该因子对植被影响力越大。探测结果如图6所示，各因子对植被NDVI的影响力排序为：土地利用类型(0.463)>植被类型(0.341)>土壤类型(0.274)>高程(0.139)>年降水量(0.089)>地貌类型(0.079)>年均气温(0.075)>坡度(0.026)>坡向(0.010)。土地利用类型、植被类型、土壤类型是主要影响因子，解释力均超过25%，表明土地利用类型因素对艾比湖植被空间分布有较大影响。高程是次级影响因子，解释力在10%以上；地貌类型、年均气温对艾比湖植被影响较小，与坡度、坡向因子相同，对植被分布存在间接影响。同时研究区内降水较少，空间差异不明显，对植被的空间分布直接影响较小。

3.2.2 因子交互作用分析 交互探测结果表明(表3)，双因子交互作用对艾比湖植被NDVI空间分布的影响力大于单因子作用，因子交互作用呈现非线性增强或双因子增强效应，不存在相互独立起作用的因子。

由表3可知，土地利用类型与除土壤类型、植被类型外各因子之间呈现非线性增强效应，显著增强了土地利用类型对植被NDVI空间分布的影响；植被类型与高程、土壤类型、地貌类型和土地利用类型之间的交互作用增强了二者对植被NDVI空间分布的影响，即存在双因子增强关系。土壤类型与坡度、坡向、年均气温和年降水量的交互作用进一步说明土壤类型较大程度影响植被NDVI分布；坡度、

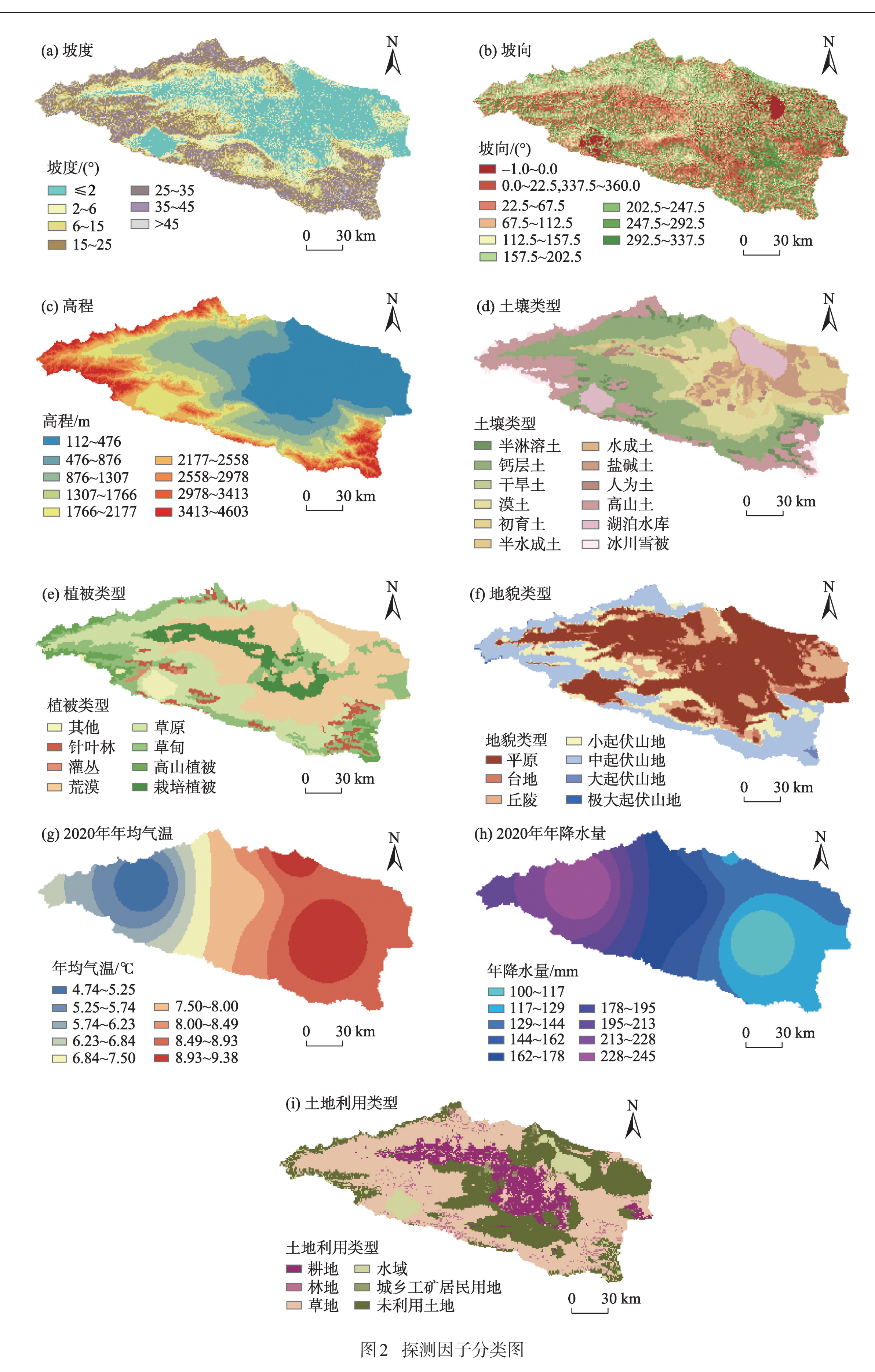


图2 探测因子分类图

Fig. 2 Classifications of the detection factors

表1 探测因子

Tab. 1 Detection factors

因子类型	探测因子	指标
地形	$X1$	坡度/(°)
	$X2$	坡向/(°)
	$X3$	高程/m
土壤	$X4$	土壤类型
植被	$X5$	植被类型
地貌	$X6$	地貌类型
气候	$X7$	年均气温/℃
	$X8$	年降水量/mm
人类活动	$X9$	土地利用类型

坡向虽然对植被的直接影响较小，但是与其他因子之间的叠加效应大大增强了单一因子对植被的影响。

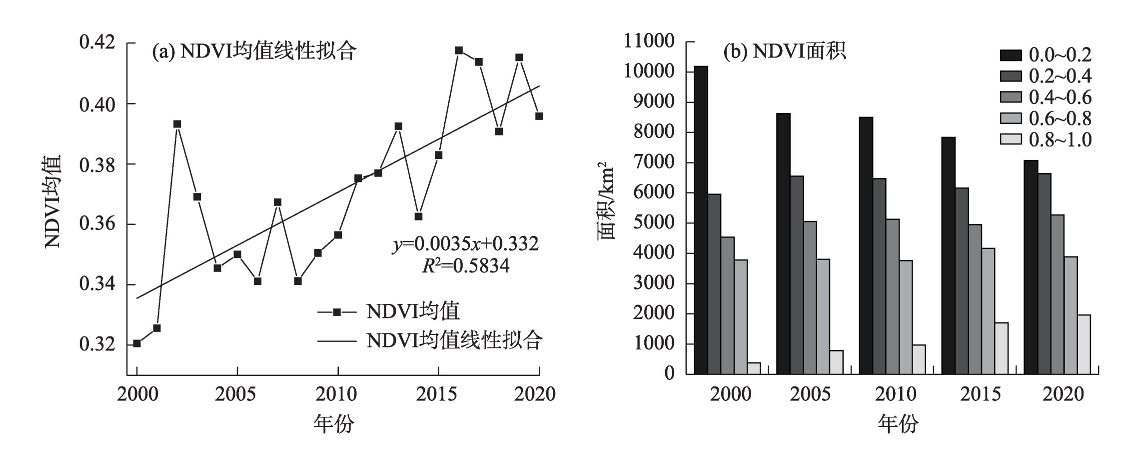
3.2.3 因子显著性差异分析 生态探测反映各因子对植被NDVI的影响是否显著，每2种因子对植被NDVI的影响是否有显著差异。当2种因子对植被NDVI的影响有显著差异则标记为“Y”，否则标记为“N”（表4）。结果表明：土地利用类型与其他因子之间对植被NDVI空间分布的影响均有显著性差异，因子探测结果显示，土地利用类型为植被NDVI变化的主导因子，生态探测结果则进一步说明土地利

表2 探测因子交互作用类型

Tab. 2 Interaction types of the detection factors

依据	交互作用
$q(X1\cap X2)<\mathrm{Min}[q(X1),q(X2)]$	非线性减弱
$\mathrm{Min}[q(X1),q(X2)]<q(X1\cap X2)<\mathrm{Max}[q(X1),q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1\cap X2)>\mathrm{Max}[q(X1),q(X2)]$	相互增强
$q(X1\cap X2)=q(X1)+q(X2)$	独立
$q(X1\cap X2)>q(X1)+q(X2)$	非线性增强

注：q为探测因子对植被NDVI的影响力。



注：NDVI为艾比湖流域年平均归一化植被指数。下同。

图3 2000—2020年艾比湖植被NDVI年际变化

Fig. 3 Annual changes of vegetation NDVI in Ebinur Lake during 2000—2020

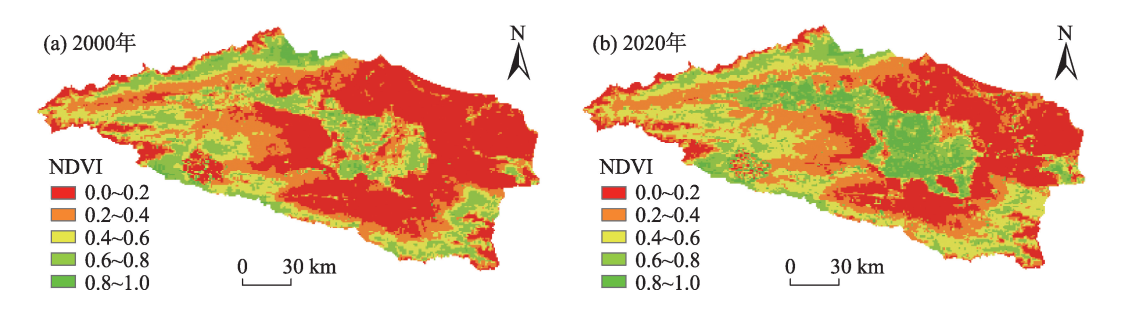


图4 2000—2020年艾比湖植被NDVI空间变化

Fig. 4 Spatial changes of vegetation NDVI in Ebinur Lake during 2000—2020

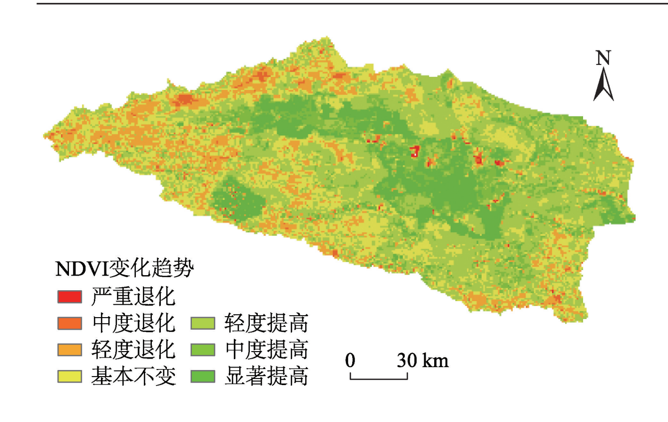
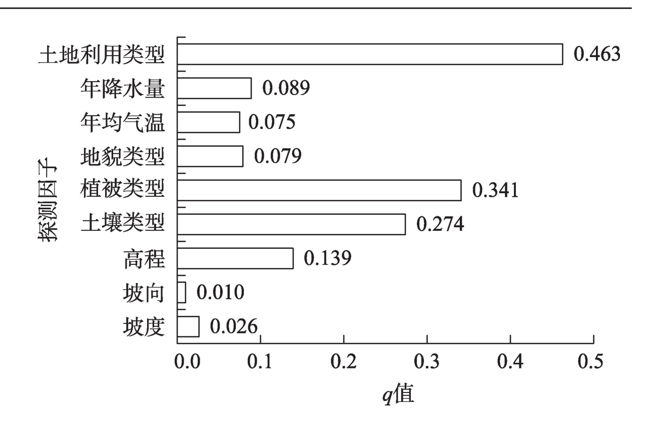


图5 2000—2020年艾比湖植被NDVI空间变化趋势

Fig. 5 Change trend of vegetation NDVI in Ebinur Lake during 2000—2020



注：q为探测因子对NDVI的影响力。

图6 因子探测结果

Fig. 6 Results of factor detector

用类型对植被NDVI的影响较大；植被类型与坡度、坡向和高程对植被空间分布有显著性差异，土壤类型与植被类型之间对植被空间分布无显著性差异，与其他因子对植被空间分布存在显著差异，说明土壤类型与植被类型对植被NDVI影响程度相似且影响力较大；地貌类型、年均气温、年降水量均与土地利用类型、土壤类型、植被类型有显著差异，坡度、坡向与高程、土地利用类型、土壤类型、植被类型有显著差异，进一步说明这几类因子对植被空间分布影响较小。

表3 各因子交互作用

Tab. 3 Interaction of each factor

因子	坡度	坡向	高程	土壤类型	植被类型	地貌类型	年均气温	年降水量	土地利用类型
坡度	0.03								
坡向	0.09+	0.01							
高程	0.21+	0.25+	0.14						
土壤类型	0.34+	0.40+	0.42+	0.27					
植被类型	0.38+	0.39+	0.46++	0.47++	0.34				
地貌类型	0.11+	0.13+	0.22+	0.33++	0.41++	0.08			
年均气温	0.21+	0.20+	0.35+	0.48+	0.47+	0.24+	0.08		
年降水量	0.25+	0.23+	0.38+	0.51+	0.47+	0.27+	0.11++	0.09	
土地利用类型	0.52+	0.50+	0.64+	0.61++	0.58++	0.55+	0.56+	0.55+	0.46

注：+代表两因子之间是非线性增强关系；++代表两因子之间是双因子增强关系。

表4 生态探测结果

Tab. 4 Results of ecological detection

因子	坡度	坡向	高程	土壤类型	植被类型	地貌类型	年均气温	年降水量	土地利用类型
坡度									
坡向	N								
高程	Y	Y							
土壤类型	Y	Y	Y						
植被类型	Y	Y	Y	N					
地貌类型	N	N	N	Y	Y				
年均气温	N	N	N	Y	Y	N			
年降水量	N	N	N	Y	Y	N	N		
土地利用类型	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	

注：在95%置信度下，Y表示2种因子对植被NDVI的影响存在显著性差异，N表示无显著性差异。下同。

3.2.4 因子适宜性分析 根据风险探测结果，表示出各因子适应范围(类别)(表5)。25°~35°的坡度范围、157.5°~202.5°的坡向、2177~2558 m的高程范围内植被NDVI均值最大，说明在上述地形因子范围内植被覆盖较好；人为土的土壤类型、栽培植被、中起伏山地以及耕地的植被NDVI值最大，植被生长状况好；4.74~5.25 ℃的年均气温、228~245 mm的年降水量范围内植被NDVI值最大，说明在以上气候因子范围内植被覆盖度高。以上因子范围(类别)有利于艾比湖流域植被生长。

根据因子风险探测结果，选择超过20%的因子进行详细分析。将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地、未利用土地6类(表6)，植被NDVI均值在耕地和林地均达到0.5以上。统计检验表明，耕地植被NDVI均值达到最大值0.73，耕地与林地、城乡工矿居民用地无显著差异，与其他区存在显著性差异。这说明耕地的植被生长较好，即在研究区内耕地类型较适合植被生长。艾比湖流域生态系统受人类活动的影响较大，耕地面积在不断增加。由图2土地利用类型空间分布所示，耕地集中于艾比湖流域中部位置，与2020年植被NDVI空间分布0.8~1.0范围大体重叠。林地分布较为分散，自然保护区的建立对流域内植被资源及生长起到保护和缓解作用。其中，草地面积在艾比湖流域占比最大，草甸、草原对于维持流域内植被生长也具有重要的作用。

将植被类型划分为其他、针叶林、灌丛、荒漠、草原、草甸、高山植被、栽培植被8类(表7)，栽培植被NDVI均值达到最大值0.71，栽培植被与灌丛无显著差异，与其他区存在显著性差异。植被NDVI均值在针叶林、灌丛、草甸和栽培植被达到0.5以上，这4类植被类型区域的植被NDVI均值较大，植被生长较好。

将土壤类型按照“土壤发生分类”系统的土纲划分为半淋溶土、钙层土、干旱土、漠土、初育土、半水成土、水成土、盐碱土、人为土、高山土、湖泊水库、冰川雪被12类(表8)，人为土植被NDVI均值达到最大值0.76，人为土与半水成土无显著差异，与其他分区存在显著性差异。植被NDVI均值在半淋溶土、半水成土、人为土这3类土壤类型中植被NDVI

表5 各因子适应范围(类别)

Tab. 5 Suitable ranges or types of each factor

因子	植被NDVI适应范围(类别)	植被NDVI均值
坡度	25°~35°	0.500
坡向	157.5°~202.5°	0.439
高程	2177~2558 m	0.572
土壤类型	人为土	0.759
植被类型	栽培植被	0.714
地貌类型	中起伏山地	0.459
年均气温	4.74~5.25 ℃	0.500
年降水量	228~245 mm	0.661
土地利用类型	耕地	0.725

注：NDVI为艾比湖流域年平均归一化植被指数。

表6 不同土地利用类型中植被NDVI均值及显著性差异

Tab. 6 Mean values of vegetation NDVI and its significant difference in different land use types

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城乡工矿居民用地	未利用土地
耕地						
林地	N					
草地	Y	Y				
水域	Y	Y	Y			
城乡工矿居民用地	N	N	N	N		
未利用土地	Y	Y	Y	N	N	
植被NDVI均值	0.73	0.66	0.42	0.25	0.54	0.21

表7　不同植被类型中植被NDVI均值及显著性差异

Tab. 7　Mean values of vegetation NDVI and its significant difference in different vegetation types

植被类型	其他	针叶林	灌丛	荒漠	草原	草甸	高山植被	栽培植被
其他								
针叶林	Y							
灌丛	Y	N						
荒漠	N	Y	Y					
草原	Y	Y	Y	Y				
草甸	Y	Y	Y	Y	Y			
高山植被	N	Y	Y	Y	Y	Y		
栽培植被	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	
植被NDVI均值	0.27	0.59	0.69	0.29	0.39	0.50	0.19	0.71

表8　不同土壤类型中植被NDVI均值及显著性差异

Tab. 8　Mean values of vegetation NDVI and its significant difference in different soil types

土壤类型	半淋溶土	钙层土	干旱土	漠土	初育土	半水成土	水成土	盐碱土	人为土	高山土	湖泊水库	冰川雪被
半淋溶土												
钙层土	Y											
干旱土	Y	Y										
漠土	Y	N	Y									
初育土	Y	Y	Y	Y								
半水成土	N	Y	Y	Y	Y							
水成土	N	N	N	N	Y	N						
盐碱土	Y	N	N	N	Y	Y	N					
人为土	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y				
高山土	Y	Y	Y	N	Y	Y	N	N	Y			
湖泊水库	Y	Y	N	Y	N	Y	N	N	Y	Y		
冰川雪被	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	N	
植被NDVI均值	0.63	0.41	0.29	0.43	0.15	0.68	0.47	0.38	0.76	0.46	0.26	0.16

均值达到0.5以上，这4类土壤类型区域植被生长较好。半淋溶土主要分布在流域山地地区，半水成土以及人为土主要分布在流域平原地区（图2）。半淋溶土具有较强的保肥能力，在山地区域保存少数的森林，为植被提供较好的发育条件。半水成土自然肥力较高，为植被生长提供部分水分来源。人为土是在人为影响下，土壤发生深刻变化，主要分布于河流附近，艾比湖流域人为土类型主要为灌漠土，人为灌溉和施肥轮作使漠土转变为灌漠土，与栽培植被类似，都是在人为影响下种植作物等，在人为因素控制下，为植被生长提供有利生长条件。

4　讨 论

艾比湖流域自东南向西北高程加深，以平原地形为主，地势平坦，山地地形主要分布在流域内的北、西、南3个边缘。统计检验表明，高程在2177 m以下的区域植被NDVI值随高程升高而增大，2558 m以上区域植被NDVI值随高程升高而减小，高海拔地区自然条件较差，植被覆盖较少，低海拔地区放牧较多，受人类活动影响较大，高程在2177~2558 m范围内，植被NDVI达到最大值，该范围内水热条件较好，适于植被生长，这符合邓煜霖等[21]的研究结果。坡度在25°~35°，植被NDVI值较大，主要分布在流域边缘，主要植被类型为草原和草甸，在这个范围内，人类活动干预的影响较小，立地条件适合植被生长，且多是天然植被，坡度＜2°的区域主要为荒漠，植被生长较少，2°~25°区域坡度相对较缓，人类活动集中，植被NDVI值反而较低。

艾比湖流域处于干旱地区，气温、降水对植被生长有一定影响。降水对植被NDVI影响力略大于

气温，符合姜红涛等[19]、孙倩等[20]的研究结果，根据流域内气温空间分布特征，气温随纬度变化较小，南北之间差异不大。由于地势是由西向东降低，年均气温空间特征是由东向西逐渐降低。统计检验结果表明，年均气温在4.74~5.25 ℃，年降水量在228~245 mm范围内植被生长较好，主要位于流域内西北部。流域内向西随海拔高度的升高，年降水量逐渐增多，为植被生长提供水分条件。艾比湖流域针叶林主要位于山地地区，山地针叶林是流域内的天然植被，在防止水土流失、水源保护方面起到重要作用。平原区栽培植被在人为操作下，能为植被根系提供稳定环境，利于流域内植被的恢复。流域灌木植被类能有效抑制生态环境恶化，同时能够适应流域内恶劣的生态环境。本研究表明气候因素对艾比湖流域植被空间分布的影响较小，人为因素起主导作用，这与王二丽等[18]的研究结果一致。随着人类生态意识的不断提高，建立生态保护区、人工植树造林等措施的实施，增大了流域内植被保护力度，将会使流域的生态脆弱问题得以缓解，使生态环境向不断改善的方向发展。

5 结 论

（1）2000—2020年艾比湖流域植被NDVI呈现增加趋势，增速为0.035·$(10a)^{-1}$。2000—2020年流域植被覆盖面积，中等级（0.4~0.6）、中高等级（0.6~0.8）和高等级（0.8~1.0）植被面积增长明显，艾比湖植被整体呈现改善的趋势，改善区域主要分布在流域中部和西部地区，显著提高地区主要位于流域中部。

（2）土地利用类型、植被类型和土壤类型因子是影响植被NDVI空间分布的主要因素，高程是次级因素，年降水量、地貌类型、年均气温、坡度和坡向对流域内植被的空间分布直接影响较小，与自然因素相比，人为因素对艾比湖流域植被NDVI变化起主导作用。

（3）生态探测表明土地利用类型、植被类型、土壤类型与其他因子共同作用存在显著性差异，进一步表明这3类因子对植被NDVI空间分布影响力大。各因子之间交互作用对植被NDVI空间分布存在双因子增强和非线性增强效应，并非简单的相互叠加作用，不存在独立关系。

（4）根据风险因子探测分析各因子促进植被生长的各因子的适宜范围（类别）。其中，耕地土地利用类型，栽培植被植被类型，人为土土壤类型，高程2177~2558 m，年降水量228~245 mm，年均气温4.74~5.25 ℃，中起伏山地地貌类型，坡向157.5°~202.5°以及坡度25°~35°，适合植被生长。

参考文献（References）

[1] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 47−58. [Zhang Geli, Xu Xingliang, Zhou Caiping, et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 47−58.]

[2] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961−974. [Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961−974.]

[3] 刘春静, 张丽, 周宇, 等. 中国新疆及中亚五国干旱区草地覆盖度反演与分析[J]. 草业科学, 2016, 33(5): 861−870. [Liu Chunjing, Zhang Li, Zhou Yu, et al. Retrieval and analysis of grassland coverage in arid Xinjiang, China and five countries of Central Asia [J]. Pratacultural Science, 2016, 35(5): 861−870.]

[4] 刘宪锋, 任志远. 西北地区植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1954−1963. [Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan. Vegetation coverage change and its relationship with climate factors in northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10): 1954−1963.]

[5] 董璐, 赵杰, 刘雪佳, 等. 1982—2015年新疆地区植被生长对气温的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2165−2170. [Dong Lu, Zhao Jie, Liu Xuejia, et al. Responses of vegetation growth to temperature during 1982—2015 in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2165−2170.]

[6] 杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 等. 1982—2012年新疆植被NDVI的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3567−3578. [Du Jiaqiang, Ahati Jiaerheng, Zhao Chenxi, et al. Dynamic changes in vegetation NDVI from 1982 to 2012 and its responses to climate change and human activities in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3567−3578.]

[7] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000—2018年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 415−424. [Sun Tianyao, Li Xuemei, Xu Min, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in the Tarim River Basin from 2000 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 415−424.]

[8] 庞冉, 王文. 基于MODIS数据的吐鲁番盆地2001—2017年植被变化及水热组合影响分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1242−1252. [Pang Ran, Wang Wen. Analysis of vegetation index chang-

es and the influence of hydrothermal combination in the Turpan Basin from 2001 to 2017 based on MODIS data[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1242-1252.]

[9] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于NOAA时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(3): 204-210. [Sun Hongyu, Wang Changyao, Niu Zheng, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(3): 204-210.]

[10] 刘军会, 高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2016-2022. [Liu Junhui, Gao Jixi. Effects of climate and land use change on the changes of vegetation coverage in farming-pastoral ecotone of northern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 2016-2022.]

[11] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[12] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776. [Peng Wenfu, Zhang Dongmei, Luo Yanmei, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1758-1776.]

[13] 裴志林, 杨勤科, 王春梅, 等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 546-555. [Pei Zhilin, Yang Qinke, Wang Chunmei, et al. Spatial distribution characteristic and its influencing factors of the vegetation cover of the upper Yellow River based on the geographical detector[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 546-555.]

[14] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 等. 2006—2016年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1583-1594. [Zhu Cong, Peng Wenfu, Zhang Lifang, et al. Study of temporal and spatial variation and driving force of fractional vegetation cover in upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1583-1594.]

[15] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 等. 2000—2015年长江上游NDVI时空变化及驱动力——以宜宾市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 5029-5043. [Tao Shuai, Kuang Tingting, Peng Wenfu, et al. Analyzing the spatio-temporal variation and driver of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: A case study of Yibin City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 5029-5043.]

[16] 张翀, 白子怡, 李学梅, 等. 2001—2018年黄土高原植被覆盖人为影响时空演变及归因分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 188-196. [Zhang Chong, Bai Ziyi, Li Xuemei, et al. Spatio-temporal evolution and attribution analysis of human effects of vegetation cover on the Loess Plateau from 2001 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 188-196.]

[17] 李艳红, 姜黎, 佟林. 新疆艾比湖流域生态环境空间分异特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 59-62. [Li Yanhong, Jiang Li, Tong Lin. Study on spatial differentiation of ecological environment in Ebinur Lake Basin of Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(11): 59-62.]

[18] 王二丽, 周军其. 1998—2012年艾比湖流域NDVI变化及其气候因子驱动分析[J]. 应用科学学报, 2015, 33(1): 59-69. [Wang Erli, Zhou Junqi. Analysis of NDVI changes and its climate factor drivers in Ebinur Lake Basin from 1998 to 2012[J]. Journal of Applied Sciences, 2015, 33(1): 59-69.]

[19] 姜红涛, 塔西甫拉提·特依拜, 阿尔达克·克里木, 等. 艾比湖流域NDVI变化及其与降水、温度的关系[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1678-1684. [Jiang Hongtao, Tiyip Tashpolat, Kelimu Ardak, et al. Responses of NDVI to the variation of precipitation and temperature in the Ebinur Lake Basin[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1678-1684.]

[20] 孙倩, 张敏, 曾永兵, 等. 艾比湖流域降水和风速对植被NDVI时空变化的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(11): 2407-2412. [Sun Qian, Zhang Min, Zeng Yongbing, et al. Effect of precipitation and wind speed on NDVI in Aibi Lake[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(11): 2407-2412.]

[21] 邓煜霖, 塔西甫拉提·特依拜, 姜红涛, 等. 艾比湖流域NDVI垂直梯度变化特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 508-513. [Deng Yulin, Tiyip Tashpolat, Jiang Hongtao, et al. NDVI at a vertical gradient in the Ebinur Lake Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 508-513.]

[22] 唐梦迎, 丁建丽, 夏楠, 等. 博尔塔拉蒙古自治州植被覆盖度估算[J]. 测绘科学, 2019, 44(7): 74-81. [Tang Mengying, Ding Jianli, Xia Nan, et al. Estimation of vegetation cover in the Boertala Mongolian Autonomy Prefecture based on NDVI-DFI model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(7): 74-81.]

[23] 王瑾杰, 丁建丽, 张喆. 2008—2014年新疆艾比湖流域土壤水分时空分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1784-1794. [Wang Jinjie, Ding Jianli, Zhang Zhe. Temporal-spatial dynamic change characteristics of soil moisture in Ebinur Lake Basin from 2008—2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1784-1794.]

[24] 延琪瑶, 王力, 张芸, 等. 新疆艾比湖小叶桦湿地3900年以来的植被及环境演变[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 486-494. [Yan Qiyao, Wang Li, Zhang Yun, et al. Changes in vegetation and environment in the *Betula microphylla* wetland of Ebinur Lake in Xinjiang, China since 3900 cal. aBP[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 486-494.]

[25] 彭文甫, 王广杰, 周介铭, 等. 基于多时相Landsat5/8影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1975-1988. [Peng Wenfu, Wang Guangjie, Zhou Jieming, et al. Dynamic monitoring of fractional vegetation cover along Minjiang River from Wenchuan County to Dujiangyan City using multi-temporal landsat 5 and 8 images[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1975-1988.]

[26] 陈燕丽, 龙步菊, 潘学标, 等. MODIS NDVI和AVHRR NDVI对草原植被变化监测差异[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 831-845. [Chen Yanli, Long Buju, Pan Xuebiao, et al. Differences between

MODIS NDVI and AVHRR NDVI in monitoring grasslands change [J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(4): 831-845.]

[27] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342. [Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982—2012[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5331-5342.]

[28] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 161-173. [Liu Yansui, Li Jintao. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 161-173.]

Spatiotemporal change and driving force of vegetation in Ebinur Lake Basin

REN Liqing

(Urumqi Meteorological Satellite Ground Station, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Vegetation is one of the sensitive factors reflecting the changes of the land ecosystem and plays an essential role in maintaining and regulating ecosystem stability. In this study, the Ebinur Lake Basin with complex terrain is located northwest of Xinjiang, China and has severe ecological and environmental degradation. Additionally, the ecological environment spatial specificity is obvious. Previous studies have only discussed the influence of climate and elevation on vegetation normalized difference vegetation index (NDVI) in the Ebinur Lake Basin. However, no research has been conducted on other natural and human activity factors, such as the type of vegetation and land use. Additionally, the most relevant analyses could not reveal the complex spatial anisotropy of the Ebinur Lake Basin and study the driver factors of NDVI variation quantitatively. Therefore, this paper takes the ecologically fragile area, i.e., the Ebinur Lake Basin, as the research area. The MODIS vegetation NDVI data from 2000 to 2020 and unary linear regression methods are used to analyze the characteristics of vegetation NDVI from 2000 to 2020. Then, the geographic detector model is used to investigate the influence of natural and human factors and their interaction with vegetation coverage. Furthermore, analyzing the appropriate range (categories) of various influencing factors promotes vegetation growth. The results are as follows. (1) From 2000 to 2020, the average vegetation cover in the Ebinur Lake Basin increased at the rate of $0.035\cdot(10a)^{-1}$, medium grade (0.4-0.6), medium and high grade (0.6-0.8), and high grade (0.8-1.0) vegetation area increased significantly. The ecological environment was effectively improved. The improved areas were distributed in the central and western regions. The significantly improved areas were located in the central part of the Ebinur Lake Basin. Meanwhile, severely degraded areas were scattered in the central part of the Ebinur Lake Basin. (2) The land use type, vegetation type, and soil type factors had a greater influence on the spatial distribution of vegetation NDVI than other factors as the main influencing factors. Elevation was the secondary factor. The precipitation, geomorphological type, temperature, slope, and slope had little direct impact on the spatial distribution of vegetation in the Ebinur Lake Basin. Compared with natural factors, human factors played a leading role in vegetation NDVI changes in the Ebinur Lake Basin. The interaction between natural and human factors on vegetation NDVI was dominated by nonlinear and double-factor enhancements, and there was no independent relationship. (3) Cultivland, cultivated vegetation, artificial soil, medium-undulating mountains, elevation range of 2177-2558 m, precipitation range of 228-245 mm, temperature range of 4.74-5.25 ℃, aspect of 157.5°-202.5°, and slope of 25°-35° were suitable for vegetation growth. This study explored the vegetation spatial differentiation and driving mechanism using the geographic detector model. The results of this study will provide a scientific basis for the ecological protection of the Ebinur Lake Basin.

Key words: normalized vegetation index (NDVI); vegetation change; geographic detector; Ebinur Lake Basin